孤独症谱系障碍者的视觉感知：基于贝叶斯和预测编码视角*

付春野　李艾馨　吕小康　王崇颖

(南开大学社会心理学系，天津 300350)

摘 要 贝叶斯和预测编码理论为孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)者的感觉加工异常提供了争议性的解释。通过聚焦非社会视觉信息，可从贝叶斯推理、预测编码过程和预测编码精确度三个层面概述理论细节差异并归纳实证证据。基于贝叶斯推理的弱先验和精确似然假说对 ASD 者视觉加工异常的解释仅停留在描述性层面；关注预测编码过程的假说或观点进一步推动了对 ASD 者视觉加工特异性的细化，但仍不具备解释功能；聚焦预测编码精确度的假说提供了理论解释，但需进一步完善理论细节和更多精细化的实证研究加以检验。未来研究应通过先细化再整合的路径归纳 ASD 者预测加工特异性、从 ASD 者主观体验视角检验理论内容及从发展性视角考察预测功能在 ASD 者成长中的变化。

关键词 孤独症谱系障碍，视觉感知，非社会信息，贝叶斯，预测编码

1 引言

孤独症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)是一种病因不明的异质性神经发育疾病，其影响涉及感觉加工(Robertson & Baron-Cohen, 2017)、运动行为(Zampella et al., 2021)和社会功能(黄钰杰 等, 2023)。社会性变化(social alterations)理论认为社交障碍是 ASD 的核心障碍，但 ASD“感觉优先”(sensory-first account)理论提出，感觉加工异常是 ASD 发展的关键因素(Falck-Ytter & Bussu, 2023)。此异常始于婴儿期(Chen et al., 2022; Piccardi et al., 2021; Falck-Ytter et al., 2018)，甚至在行为症状出现之前已存在。这类理论、观点和实证挑战了以社会变化为核心的 ASD 理论，提出 ASD 的差异出现在更广泛的感觉加工过程，而非局限于社会领域。由于几乎所有大脑经验性发育的基础均依赖感官知觉，研究者提出感觉加工异常导致 ASD 幼儿回避不可预测的社会环境，进而无法从中学习社会互动和言语沟通(Falck-Ytter & Bussu, 2023)。

聚焦感觉加工异常，研究者试图提出可解释 ASD 者非典型感觉的理论。贝叶斯理论

---

* 中央高校基本科研业务费（63232141）和天津市自然科学基金（23JCZXJC00320）资助。
通讯作者：王崇颖, E-mail: chongyingwang@nankai.edu.cn

(Bayesian theory)指出，大脑并非被动地对感官信息形成表征，而是通过层级生成模型(hierarchical generative models)推测感官信息的意义(Clark, 2013)。因此，感知来源于先验信息与感官信息的建构。基于此，Pellicano 和 Burr(2012)率先提出，ASD 者不能使用先验信息来预测传入的感官信息，导致其感知到的是更“真实”的感官世界。在这一假设提出后，大量在贝叶斯理论视角下解释 ASD 感觉加工异常的假说和理论迅速发展起来(Brock, 2012; Lawson et al., 2014; Palmer et al., 2017; Sinha et al., 2014; Van de Cruys et al., 2014)，这些理论在解释 ASD 非典型感觉加工的细节上存在差异。

理解 ASD 者感觉加工异常的形成机制，可对 ASD 早期筛查、诊断及针对性的干预方案产生一系列积极影响(柴浩 等, 2022)。因此，有必要对 ASD 感觉加工异常的理论解释进行整合。有研究者尝试忽视不同理论间的细节差异，通过更广泛层面上的一致性归纳实证证据。具体来说，只考虑 ASD 个体使用先验进行感知的过程是否与典型发育(typically developed, TD)个体存在差异，而不考虑具体的差异是什么，并将此命名为“不平衡假说”(the imbalance hypothesis; Chrysaitis & Seriès, 2023)。遗憾的是，这种理论层面的妥协并没有获得明确的结论。虽然该主题下研究内容广泛、方法多样，但支持或不支持不平衡假说的结果各半，且存在矛盾。基于这一局面，Chrysaitis 和 Seriès(2023)认为将大量实证证据统一成连贯的理论整体，是一项几乎不可能完成的任务。

因此，尝试与 Chrysaitis 和 Seriès(2023)相反的思路，区分理论细节并限定实证证据类型可能是整合理论差异的途径。这主要可通过以下三个具体方面来实现。首先，厘清理论之间的细节差异，发现其矛盾或可整合之处，再进一步结合实证证据对理论细节进行检验。第二，聚焦于视觉通道以减少干扰变量。从贝叶斯理论视角考察 ASD 感知的实证研究跨越不同的感觉通道，而不同感觉通道的预测编码过程并不能用单一的认知过程解释(Schubert et al., 2023)，将焦点限制在视觉通道可减少潜在的混淆和变异性来源。此外，对 ASD 婴儿和老年人的脑成像研究均强调了视觉皮层是整个发育过程中持续存在改变的潜在热点(Martínez et al., 2020; Gandal et al., 2022; Jassim et al., 2021; Girault et al., 2022)。第三，仅关注非社会视觉信息。社会视觉信息指与社会互动直接相关的刺激，例如面孔、表情、眼神或肢体语言等。鉴于最初引入贝叶斯视角是为了解释 ASD 的感觉加工异常，因此对社会和非社会信息的区分是重要的(陈晓雯 等, 2020)，可进一步明确问题是否存在于更广泛的感觉加工，而非特定于社会领域。

综上，本文在厘清贝叶斯框架下的相关概念和理论后，从贝叶斯推理、预测编码过程和预测编码精确度三个层面概述解释 ASD 感觉加工异常的理论，并归纳非社会视觉通道下的

相关实证结果。在此基础上，总结理论间的联系与区别，并对未来的研究方向提供建议。由于 ASD 具有谱系性，孤独特质(autistic traits)指 TD 个体在多大程度上具有与 ASD 个体相关的特征(Baron-Cohen et al., 2001)，而有研究将高孤独特质个体作为研究对象，本文将此类研究也纳入综述范围。

2 基础概念和理论澄清

将视觉感知视为贝叶斯推理的观点产生了大量相似的概念集合，同时又发展了相应的理论。这里首先澄清贝叶斯推理的一些基本概念，再概括贝叶斯理论和预测编码理论的差别与联系，以更好地展开后续内容论述。

在贝叶斯推理的框架下，先验(prior)、似然性(likelihood)和后验(posterior)是关键术语。先验指在观察新场景之前已有的知识或假设(Sapey-Triomphe, Pattyn, et al., 2023)，可分为结构性(structural)和语境性(contextual)先验(Seriès & Seitz, 2013; Teufel & Fletcher, 2020)。前者反映与生俱来或过度学习的统计规律，例如光线自上而下、水平或垂直的线条在生活中更常见(Girshick et al., 2011)；后者源于特定背景下的规律，例如根据场景来预测可能出现的物品。语境性先验适用性有限，但可通过经验快速灵活地学习(Van de Cruys et al., 2018)。先验可使个体产生预期(expectations)，预期是基于规律运行的心理机制(Summerfield & Egner, 2009)。而似然性(likelihood)则与感官输入(sensory input)联系紧密，指给定客观输入的情况下某一特定现象发生的概率，例如根据学习到的树木外观模型观察到的某一种树木颜色为绿色的概率。通过先验与似然性的整合，可形成后验(posterior)分布，即生成感知(perception) (Sapey-Triomphe et al., 2021)。可以发现，似然性、先验和后验这三个术语用于贝叶斯的计算框架中，而感官输入、预期和感知则为描述意识体验的发生过程。在此框架下，感官输入(似然性)和预期(先验)的整合形成了感知(后验)。

另一类概念集应用于预测编码理论(predictive coding theory, Friston, 2005; Summerfield & Egner, 2016)的框架中，该理论指出感知是预测编码的结果。预测(prediction)指根据先验来感知外界，更强调感知过程。例如我们会根据经验预测下班回到家房间物品的摆放与早晨离开时一致。预测误差(prediction errors)来自于预测与感官输入之间的对比，预测误差可用于更新先验，或在发出无用噪声时被忽略(Friston, 2005)。例如当你进入房间，沙发轻微移动了位置，则预测误差较小；但如果沙发直接调转了方向，则预测误差较大，你会发现沙发有移动痕迹，进而更新信息。因此，预测误差会激发学习并更新先验，当下的预测误差会影响随后

的预测。另一个关键的概念是精确度(precision)，精确度指大脑做出预测的精确或严格程度(Feldman & Friston, 2010)。高精确度意味着你的大脑期望看到的东西与预测完全一致，低精确度意味着如果外界不完全像预测的那样，则有更大的容忍度。例如，如果你的大脑对房间的预测具有很高的精确度，那么即使像椅子被移动轻微位置的小变化也会被大脑记录为一个重大的意外事件。但如果预测的精确度很低，即使房间里出现了一个新物品则也可能不会被发现。如果精确度较高，符合预测的刺激也会激活较强的神经活动(Bowman et al., 2023)。

贝叶斯理论和预测编码理论的主要区别在于它们如何解释大脑功能：贝叶斯理论认为，大脑根据当前的感官输入和预期进行贝叶斯推理，以产生对世界的感知。随着时间的推移，大脑不断积累证据，以概率的方式更新其内部模型；而预测编码理论提出，大脑根据其内部模型不断对传入的感官信息产生预测，然后与实际的感官输入进行比较，计算预测误差，并相应地更新内部模型。在预测编码框架下，大脑是一个分层组织，较高的层级产生预测，较低的层级计算预测误差。信息流有自上而下的预测和自下而上的预测误差两个方向。预测编码强调自上而下和自下而上的信号在皮层的不同层级之间的持续相互作用。虽然两者都基于贝叶斯原理，但预测编码提供了一个更详细的机制框架，专注于大脑分层网络中的预测和预测误差。而贝叶斯理论更抽象，只关注感知推理本身。因此，预测编码可被认为是贝叶斯推理在大脑中的神经实现。

3 理论争议与实证证据

在贝叶斯或预测编码的框架下，许多理论将 ASD 个体的非典型感官体验归因于预测障碍导致的根本差异。然而，这些理论的具体细节却大相径庭。本部分从三个层面解读现有理论并归纳实证证据：评估先验与似然性相对权重的贝叶斯推理(Pellicano & Burr, 2012; Brock, 2012)、 关注预测建立与预测更新的预测编码过程(Sinha et al., 2014)、聚焦感官输入和预测误差的精确度(Lawson et al., 2014; Palmer et al., 2017; Van de Cruys et al., 2014)。通过三个层面理论的介绍与对比，绘制出当前理论在解释 ASD 过程中的交汇和分歧。

3.1 贝叶斯推理视角下的假说与实证证据

3.1.1 弱先验假说和精确似然假说

Pellicano 和 Burr(2012)用弱先验(hypo-priors)解释 ASD 者的感觉异常，并提出弱先验假说(hypo-priors hypothesis)。弱先验是一种衰减且更广泛的先验，这种先验意味着 ASD 者对

内部感觉信息的约束减少，导致其更依赖感官信息，体验到更“真实”的世界(Pellicano & Burr, 2012; Pellicano, 2013)。弱先验会使 ASD 者处于一种被感官信息淹没(overwhelmed)的状态，这为 ASD 者的刻板行为和追求规律的症状提供了解释。

在弱先验假说的基础上, Pellicano 和 Burr(2012)预测了 ASD 者的部分非典型感知和行为。由于弱先验, ASD 者在某些时候会比 TD 者形成更准确的感知。例如错觉被视为先验参与后得到的对于现实世界的统计最优解(Weiss et al., 2002)，而 ASD 者由于先验的约束较弱，则更不易产生视错觉和视觉偏差(Rozenkrantz et al., 2021)。但是，在面对高噪声的感官输入时，由于缺乏先验的助攻，则会削弱他们的任务表现。弱先验假说也对 ASD 者的视觉整体感知做出预测。从整个视觉场景中提取有效视觉信息的能力对形成和维持先验至关重要(Pellicano & Burr, 2012)。作为一种统计表征，先验可从经验中提取，也可同时从场景中提取统计数据，从而将局部元素的特征进行总结(Whitney & Yamanashi, 2017)。弱先验假说预测，ASD 者从视觉场景中提取统计数据的能力也可能相对较弱(Pellicano & Burr, 2012)。

弱先验假说认为 ASD 者感觉异常的关键在于较弱的先验，但 Brock(2012)却指出从贝叶斯理论出发还存在另一种可能性。基于贝叶斯理论模型, ASD 者处于感官信息淹没的状态有两种途径: 一种是降低先验的集中程度(先验的方差增大，即更广泛的弱先验)，另一种则是增加感官信息的集中程度(似然性的方差减小，即更少的感觉噪声)。对应弱先验假说，后者可称为精确似然假说(sharper likelihood hypothesis, Brock, 2012)。例如在橡胶手视错觉的研究中发现，相比 TD 成人, ASD 成人估计感官信息时精确性更高(Paton et al., 2012)。精确似然假说为 ASD 者的感觉加工异常提供了自下而上的解释路径。

精确似然假说的提出，并非旨在形成与自上而下的弱先验假说的竞争关系，而是强调客观平等地讨论贝叶斯理论下这两种解释路径的重要性。这两种假说均有能力解释当前 ASD 者的感官体验在贝叶斯结果中的偏移。因此，实现这两种假说对结果影响的分离至关重要。

3.1.2 贝叶斯视角下的相关实证证据

支持弱先验假说的大多证据基于错觉现象。研究发现，当使用声音诱导闪光错觉时，相比于 TD 儿童, ASD 儿童感知到更少的闪光错觉(Stevenson et al., 2014)；还有研究者采用线段辨别任务，将两条水平险段叠加在黑白点背景下，这些黑白点组合在一些试次中会引发庞佐错觉(Ponzo illusion)。尽管 ASD 成人组和 TD 成人组均未意识到庞佐错觉，但 ASD 组受错觉的影响要显著低于 TD 组(Carther-Krone et al., 2016); Nayar 等(2017)使用眼动追踪技术，对比 ASD 和 TD 儿童在注视卡尼萨错觉(Kanizsa illision)图形轮廓时的眼动轨迹。相比于 TD 儿童，

ASD 儿童较少注视卡尼萨错觉轮廓中心，表明整体感知能力下降。另有研究使用功能性核磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术，要求参与者观看一系列随机生成的卡尼萨错觉图形。结果发现，与 TD 儿童相比, ASD 儿童枕叶外侧区域的自动轮廓整合能力减弱(Knight et al., 2023)。

支持弱先验假说的证据也跨越不同的研究内容和实验范式。有研究者以穆尼图像(Mooney images)为刺激，比较参与者在呈现刺激原图前后对退化图片的视觉加工模式变化。TD 青少年在观察第二次呈现的退化图片时眼球运动发生了自上而下的优化，注视次数减少且注视距离变短，而这种优化在 ASD 青少年中则显著降低(Król & Król, 2019)。高孤独特质个体中也发现弱先验现象，例如高孤独特质成人不易受方向线索提示的影响，更依赖感官信息获得真实的感知(Lawson et al., 2018)。针对视觉动态刺激的研究也发现，当视觉线索提供球落地点的概率信息时，相比于 TD 成人组, ASD 成人组的视觉运动模式没有明显受线索影响(Arthur et al., 2023)。此外，也有研究发现相比于 TD 成人, ASD 成人从快速呈现的视觉场景中提取颜色统计信息的能力受损，且 ASD 成人对单个颜色的辨别更优秀(Maule et al., 2017)。神经层面也获得了相应证据。有研究使用脑磁图扫描技术，利用视觉区域 V1 和 V4 间的连通性考察 ASD 成人对简单光栅的视觉加工是否受情境调制。结果发现, ASD 成人在由 gamma 介导的前馈 V1 到 V4 间的连接无异常，但由 alpha 介导的反馈 V4 到 V1 间的连接显著减少(Seymour et al., 2019)。

另一方面，也有大量的研究结果不支持弱先验假说。研究者同样使用穆尼图像为刺激，要求参与者在呈现原图之前和之后识别退化图片。结果发现，相比于 TD 青少年组，无论是高孤独特质还是 ASD 青少年组，在呈现原图后准确性均提高，这表明 ASD 组形成了特定先验，并能在任务中完整使用先验(Van de Cruys et al., 2018)。另有研究以判断模糊刺激偏左还是偏右为任务，并在模糊刺激前设置线索来诱导偏差的形成。结果发现, ASD 和 TD 青少年均受线索影响而出现反应偏差，且两组在偏差水平上无差异，这表明 ASD 青少年在低水平视觉感知中同样会受到先验的影响(Bosch et al., 2022)。神经活动层面，有研究以卡尼萨错觉材料为刺激，发现在视觉 V1 区, TD 青少年组和 ASD 青少年组均同时存在上调和下调的加工模式，表明初级视觉皮层的错觉形状加工在 ASD 者中同样存在(Utzerath et al., 2019)。这些研究大部分与支持弱先验假说的研究使用了相同或类似的实验范式，尽管不能充分证伪弱先验假说，但足以说明弱先验在 ASD 者中具有一定程度的不稳定性。

即使支持弱先验假说的结果也无法排除精确似然假说的解释，有研究者开始尝试使用技术手段分离先验和似然性对视觉感知的影响。有研究者指出，导致目前不一致结果的关键

是缺乏能计算出行为差异是来自于较弱的先验还是较强的似然性的计算模型(Karvelis et al., 2018)。Karvelis 等(2018)以视觉运动感知为研究内容, 使用统计学习任务, 参与者需在任务中估计连贯的点云运动方向。以往研究表明, TD 个体会迅速、内隐地对最常出现的运动方向产生预期, 进而使他们在低对比度试次中对点云运动方向的感知产生偏差(Chalk et al., 2010)。通过贝叶斯计算模型定量评估似然性和先验的变化, 结果显示, ASD 成人的先验并没有减弱, 而是形成更精确的感官表征。另一项脑电研究中, 通过提供目标出现位置的概率性信息, 考察先验信息对视觉检测任务(灰色棋盘格)的影响。采用信号检测理论(signal detection theory)和漂移扩散模型(drift diffusion model)揭示视觉感知形成的决策参数, 结果发现 ASD 成人在视觉决策中赋予感官信息更高的权重(Tarasi et al., 2023)。这些结果明确支持了 Brock(2012)的精确似然假说。

3.2 基于预测编码过程的假说与实证证据

3.2.1 预测编码损伤假说

基于贝叶斯理论的假说为理解 ASD 的感知异常提供了切入点, 但其并未阐明先验如何变弱或似然性如何增强, 因此研究者提出应在更具体的预测编码框架下去解释 ASD 者的感知异常(van Boxtel & Lu, 2013)。围绕预测编码过程, 提出了多种关注 ASD 预测特异性的相关假说或观点。根据对预测编码过程中不同阶段的关注, 这些假说和观点可划分为预测建立损伤和预测更新损伤两个阶段, 统称为预测编码损伤假说。

预测建立损伤阶段侧重于符合预测维度的异常。虽然未基于严格意义上的预测编码理论, Sinha 等(2014)提出, ASD 与对事件的预测异常(条件概率的不准确估计)有关, 并将其命名为 ASD 预测损伤假说(predictive impairment in autism, PIA)。当前后两事件的关系较弱或存在较大的时间跨度时, ASD 者对其关系的敏感性降低, 即无法建立有效预测。这种时间维度上预测能力的缺失将破坏 ASD 者下一步行动的计划和判断。例如 Brisson 等(2012)对 ASD 儿童早期喂食录像的观察发现, 他们在被喂食时未能有效地对接近的勺子做出预期的张口反应。无法建立有效的预测导致 ASD 个体很难适应感官环境, 生活在一个看似"神奇"的世界里, 在这个世界里, 事件会意外地、毫无原因地发生。预测能力降低的一个重要结果是提高了对环境刺激的感知新奇性, 因此在神经活动层面, Sinha 等(2014)假设 ASD 者会存在过度激活现象, 表现为对符合预测信息的适应下降(Wasifa et al., 2021)。

预测更新损伤阶段则聚焦于违反预测维度的异常。严格来说, 在这一方面并未提出明确

的理论或假说，主要是通过一系列较为一致的实证研究结果获得的结论。因此，在此部分主要对这些结果进行概括性总结，并在实证部分对研究内容进行更为详尽的介绍。在预测编码框架下，对违反预测的信息产生预测误差是学习的关键。试想一下，如果在违反预测的情境下无法产生预测误差，则会按照原有的预测模式感知外界，进而错过了更新信息和建立更准确的新预测的机会。ASD 者在违反预测条件下表现出与 TD 者不同的感知模式，主要体现在他们仍然按照原有的预测模式进行信息加工，无法灵活地更新预测(Greene et al., 2019; Sapey-Triomphe et al., 2022; Treves et al., 2023)。

总的来说，预测建立损伤和更新损伤基于预测编码过程的不同阶段，因此两者之间并不存在冲突。此外，这两个阶段的损伤可能反映了同一种预测机制的异常。相比于 TD 者, ASD 者建立预测内部模型的过程更困难；而预测一旦建立，当外界环境发生变化时，他们在更新预测内部模型时亦较难。

3.2.2 预测编码损伤的相关实证证据

ASD 者的预测建立损伤已得到实证支持。通过在动态呈现中设置视觉刺激，将运动定位到两个目标位置之一，目标位置分为符合预测(高概率)和违反预测(低概率)两种。研究者考察参与者的眼动预测轨迹，结果显示, ASD 儿童、青少年和成人组需要更多的试次才能准确建立目标位置的预测，而相应年龄的 TD 组已在早期试次中形成了对目标位置的稳定预测(Ganglmayer et al., 2020; Schuwerk et al., 2016; Tan et al., 2023)。这些结果明确支持 PIA 理论。然而，也有实证研究发现 ASD 者可有效建立预测。例如, ASD 儿童预测移动视觉刺激的位置和累积时，其任务表现与 TD 儿童无差异(Tewolde et al., 2018)；另一项研究将刺激出现的位置分为规律和随机两种，结果发现 ASD 成人的任务表现与 TD 成人相当，学习的动态过程在两组之间也无差异(Pesthy et al., 2023)。这两项研究表明, ASD 者的视觉动态预测或视觉静态刺激的统计学习能力可能是完整的，挑战了预测编码普遍受损的观点。研究者提出，这可能需要进一步的研究来评估 ASD 者预测编码受损的具体情境，或非典型预测加工并不一定意味着在任务表现的行为学层面存在缺陷(Pesthy et al., 2023; Tewolde et al., 2018)。

在神经层面, PIA 假说假设 ASD 者对符合预测的感官信息表现出低适应(Sinha et al., 2014)，这一假设也获得实证支持。Wasifa 等(2021)使用脑电(Electroencephalography, EEG)技术考察 ASD 者对重复的视觉刺激是否会发生重复抑制，即对重复刺激的神经活动减弱。结果发现, TD 儿童对重复刺激的 P1 成分显著降低，即产生重复抑制；而 ASD 儿童却表现出 P1 成分增强的趋势。这一结果支持PIA 假说，但另一项 fMRI 的研究则未发现一致结果。D’Mello

等(2023)也采用重复抑制范式，结果发现 ASD 成人与 TD 成人一样，对客体刺激在双外侧枕区皮层(bilateral lateral occipital cortex)、对单词刺激在左梭状回(left fusiform gyrus)均存在神经活动上的重复抑制效应。研究者认为这表明 ASD 者建立预测的大脑功能与常人无异。

值得注意的是，重复抑制范式是否能有效操纵预测实际上存在争议。Feuerriegel 等(2021)指出，重复抑制范式会混淆物理适应和心理适应。简言之，刺激的多次重复会引起物理适应，但要确定是否导致心理适应，则需分离刺激的物理属性。视觉统计学习范式(visual statistical learning paradigm)能够有效地分离刺激的物理属性，在该范式中会相继呈现线索和目标，线索可预测目标出现的概率(高概率为符合预测，低概率为违反预测)。通过平衡不同线索与目标的关系，该范式可实现在同一组块内不同目标出现的次数保持一致，进而控制刺激的物理属性。一项 fMRI 研究在视觉统计学习范式的基础上，通过设置线索与目标是否为同一刺激来操纵重复性，据此分为符合预测的重复和非重复、违反预测的重复和非重复 4 种实验条件。结果发现，ASD 青少年对重复刺激在侧枕叶皮层(lateral occipital cortex)的神经活动减弱，表现出重复抑制；而对符合预测的刺激则神经活动增强(Utzerath et al., 2018)。这表明 ASD 者存在完整的物理适应，但对符合预测的刺激则无法实现心理适应。

也有研究发现 ASD 者在违反预测条件下无法有效更新预测。使用联想学习任务，将音调与点对的旋转方向建立概率性联系，参与者需要报告点对的旋转方向。结果发现，TD 成人组和 ASD 成人组均会根据概率产生预测。但是，当违反预测时，ASD 组预测更新更少(Sapey-Triomphe et al., 2022)。还有研究使用眼动追踪技术，探究 ASD 和 TD 青少年在视觉学习中的眼动模式。以简单视觉刺激为线索，为后续的视觉刺激位置提供预测信息。结果发现，在违反预测的试次中，ASD 青少年较少将目光集中在与习得的先验相对应的位置上，不能更新线索—结果联系，进而无法产生有效的预测误差(Greene et al., 2019)。Treves 等(2023)在实验中设置了目标位置的可预测性，一个绿色星星会出现在 4 个位置中的一个。在具有预测性的组块内，刺激位置以一个固定的序列重复呈现，而在非预测性的组块内，刺激位置随机呈现。结果发现，在实验早期，当刺激从重复序列转变为随机位置时，ASD 成人组出现的错误更少。这也同时表明 ASD 组失去了从错误中学习新的应对方式的机会。

3.3 聚焦预测精确度的理论和实证证据

3.3.1 异常精确度假说和 HIPPEA 理论

作为预测编码理论的提出者，Friston 等(2013)认为 ASD 感觉加工异常是由于预测精确度

降低，导致个体无法在感知整合过程中将预测实例化。在该框架下，预测精确度控制了个体对预测和感官信息的信任程度。在大脑的分层加工中，不同层级对预测精确度的估计存在差异。 这种估计实际上是一种元认知，因此 Friston 等(2013)提出 ASD 在本质上应当被视为元认知障碍。立足于 ASD 预测精确度受损的观点，Lawson 等(2014)提出异常精确度假说(aberrant precision hypothesis)，其核心要点在于预测精确度和感觉精确度的不平衡。也就是说，ASD 个体在神经系统高层级会产生相对低的预测精确度，而在神经系统低层级会产生相对高的感觉精确度，这种不平衡主要是由低层级上感觉精确度无法降低所导致的。相比于自上而下的预测加工，异常精确度假说主张自下而上的感官信息的非典型处理才是 ASD 症状的核心来源。

与异常精确度假说相同，ASD 高且不灵活的预测误差精确度(high and inflexible precision of prediction errors in autism, HIPPEA)理论也将精确度估计作为核心。不同的是，HIPPEA 理论主张由于对预测误差的高且不灵活的精确度估计导致了 ASD 的系列非典型感觉症状(Van de Cruys et al., 2014)，预测误差的精确度是感觉精确度和预测精确度之比。并且，Van de Cruys 等(2014)为了更完整的解释 ASD，提出需要对在更长的时间维度上精确度所产生的变化或动态调整机制进行解释。对预测误差的精确度估计在预测编码中时刻存在，并且会根据环境输入以及生物体状态灵活调整，这种调整依赖于以往的学习以及对当前环境不确定性的判断。外界环境提供的线索可分为两类：不可减少(irreducible)和可减少(reducible)的不确定性。前者是由于世界固有的随机性和我们对世界的感知存在固有噪声而产生的，而后者则需要个体内化学习，并将其用于修正预测。当环境中存在可减少的不确定性时，TD 者的精确度将会升高，以增强对预测误差的感知，并启动对新规律的学习。而对于 ASD 者来说，其能够生成预测误差，但对于预测误差的精确度估计却始终过高且不灵活。这意味着 ASD 者将始终高估外界环境的变异性，并处于一种不停学习外界新规律的状态。

基于预测编码精确度视角，人类为了应对复杂多变的生存环境，有必要将不确定性降到最低，从而避免被周遭的大量刺激所淹没。而正是由于这一能力的缺失，导致 ASD 者体验到的是混乱和无序的世界，始终处于过度学习的状态。过度学习将导致更狭窄先验的形成，因此 ASD 者的预测将与现实产生极大的偏移，并且其并不会将这些误差视为可忽略的噪声。这等同于 ASD 者的感知泛化能力几乎为零。

3.3.2 与预测精确度相关的实证证据

由于所检验的机制更加具体，因此在实验范式上，对预测编码精确度相关假说的实证检

验在设计上普遍更复杂。有研究使用宽高错觉(width-height illusion，即高的矩形比低的矩形看起来更窄)，通过对矩形的垂直边缘进行模糊化来增强感官输入的噪音。研究发现，对矩形边缘的模糊化会导致 TD 成人组的宽高错觉增强，但是对于 ASD 成人组则没有发生差异。也就是说, ASD 者虽然可以受预测的影响产生宽高错觉，但是当感官输入更加模糊时，则不会增强预测在感知过程中的权重。研究者认为，这表明 ASD 个体存在一种不灵活的、非适应性的预测精确度(Binur et al., 2022)。

另一项研究则利用刺激感知中的时间顺序效应(the time-order effect)来检验精确度假说。当多次重复感知客体刺激的大小时，视觉感知会偏向平均值。而当比较先后呈现的两个客体刺激大小时，由于第一个刺激需要保持在记忆中，进而第一个刺激的噪音更大导致感觉精确度会更低，致使第一个刺激更容易受到先验的影响，因此对其感知更偏向于平均值，即产生时间顺序效应。在实验中，研究者让参与者比较先后呈现的两个黑色实心圆的大小，通过设置第一个圆的先验范围更狭窄和更宽泛，前者可产生比较准确的先验，而后者则产生不准确的先验。研究者认为，弱先验假说会预测两种条件下均无时间顺序效应；而精确似然假说则同样预测均无时间顺序效应，但 ASD 组的任务表现会更好; HIPPEA 理论则会预测两种实验条件下均会产生时间顺序效应，但 ASD 组在两种实验条件下的时间顺序效应无差异。研究结果支持 HIPPEA 理论, TD 成人组参与者在第一个圆先验范围较狭窄时产生的时间顺序效应更大，而 ASD 成人组参与者则在两种实验条件下产生的时间顺序效应无差异。这表明 ASD 者的对精确度持有不灵活的权重(Sapey-Triomphe et al., 2021)。

另一项研究使用视觉搜索任务，在实验中，一个显著但与任务无关的干扰物在一侧位置出现的概率更高(符合预测)，而在另一侧的概率更低(违反预测)。结果发现，与 TD 成人组一致, ASD 成人组也学会了避免被出现在符合预测位置的干扰物捕获注意；然而，当干扰物出现在违反预测的位置时, ASD 组则无法像 TD 组那样有效避免注意被捕获，导致任务表现降低。研究者认为该结果支持 HIPPEA 理论(Fredrik et al., 2021)。具体来讲, HIPPEA 理论认为 ASD 者对微小的预测误差过于敏感，导致“每一次轻微的违反规律都会引发新的学习”(Van de Cruys et al., 2014)。当一个突然出现在非预测位置的干扰物违反了先前建立的规律时，所产生的预测误差触发了新的学习过程，使 ASD 者的注意被干扰物所捕获。而 TD 者则能更好地抑制这种注意捕获，因为他们对微小的预测误差的敏感性较低。

在神经活动层面, HIPPEA 理论也获得了实证的支持。使用 fMRI，以声音为线索对一点对的旋转方向提供预测，通过反转的视觉感知推理模型，可表征 ASD 者在不同层级的预测和预测误差的神经相关活动。研究结果发现，在行为学层面上, ASD 成人的预测能力与 TD

成人一样完整; 而在神经活动层面, 预测在 TD 组和 ASD 组中均为分层编码, 预测误差会导致两组中共享区域的激活, 但是在前扣带回皮层(anterior cingulate cortex)和丘脑(putamen)中发现了组间差异, ASD 成人在中高级预测的神经活动上对预测误差进行更强的编码(Sapey-Triomphe, Pattyn, et al., 2023)。研究者认为, 这一结果支持 HIPPEA 理论, 表明预测误差过高的精确度可能是导致 ASD 者预测困难的原因。

但是, 也有研究并不支持预测编码精确度假说。Ward 等(2022)认为由于精确度是感知和学习的基本组成部分, 因此应在临床症状完全出现之前检测到这种差异。研究者以高 ASD 可能性和低 ASD 可能性的 3 岁儿童为研究对象, 使用内隐学习范式来检验感觉噪声对建立预测的影响。为了学习一个序列, 参与者必须选择要注意的视觉信息, 并忽略由感觉噪音引起的较小的预测误差。研究结果发现, 与低 ASD 可能性儿童相比, 当添加感觉噪音时, 无论是在反应时还是位置决策上, 高 ASD 可能性儿童均没有表现出对预测误差更为敏感的迹象。研究者认为, 这一结果对 ASD 高精确度的理论提出了挑战(Ward et al., 2022)。但鉴于这一研究所使用的被试群体的特异性以及仅使用行为学指标, 其结论需要更多实证研究加以检验, 用于反驳 HIPPEA 理论不够充分。

3.4 理论间的联系与区别

Pellicano 和 Burr(2012)开创性地从贝叶斯理论视角解释 ASD 感觉加工异常并提出弱先验假说, 而 Brock(2012)则提出精确似然假说, 认为过于精确的感觉表征导致 ASD 者的感知难以与自上而下的先验整合。这两种假说都能够在一定程度上对应 ASD 者易被感官细节吸引、难以建立整体表征或被感官信息淹没等症状。然而, 当前的实证证据存在分歧。发现和未发现弱先验的研究几乎处于持平状态, 关键的是, 当采用一些分析方法将感官信息编码强度与先验使用能力分离开来进行评估时, 结果发现 ASD 者主要是在感官信息编码方面存在增强(Karvelis et al., 2018; Tarasi et al., 2023)。这一发现似乎更支持精确似然假说。

在预测编码理论框架下, 对 ASD 者感觉异常的解释可进一步区分为两个层面: 预测编码过程和精确度。预测编码过程集中于预测建立损伤和更新损伤, 其为贝叶斯理论框架下 ASD 的弱先验假说提供了更深入的解释路径。之所以 ASD 者难以利用先验, 核心原因是整个预测与更新的动态编码过程障碍—既难以形成稳定的预测表征, 也难以根据预测误差调整更新预测模型。聚焦精确度的理论与精确似然假说一致, 均将 ASD 异常感知归因于感觉输入出现了问题(Van de Cruys et al., 2014), 不过其进一步深化和明确了预测编码机制。与精确似然假说聚焦于感官信息编码本身的高强度不同, 异常精确度假说和 HIPPEA 理论进一步

阐明了 ASD 者为何会对感官信息过度投入注意和认知资源的机制，更为微观地剖析了预测编码中权重分配的紊乱。同时，预测编码框架下提出的理论也强调了动态预测编码过程的重要性。

整体来讲，三个层次的理论相互衔接、递进发展(图 1)。贝叶斯框架为预测编码理论奠定了基础，而预测编码理论则对贝叶斯框架中的观点作了更为系统性的发展与理解。同时，这三个层面也存在关注重点的差异。贝叶斯框架主要是表象层面的理论假说，预测编码过程理论则更多聚焦于编码动态的失常环节，而精确度理论则直接分析了预测编码中感官信息权重分配的偏差。三者共同构建了一个多层次、系统性的理论架构，有助于我们全方位地描绘 ASD 视觉加工的独特“画像”。这些假说或理论的核心是强调预测加工的可分离的组成部分，这些部分并不需要在一个层次框架内相互排斥。

但同时，这并不意味着这些理论或假说均可解释 ASD 的视觉加工异常。这些假说或理论可被视为是精确性的连续体—从相对宽泛且更倾向描述性的理论到越来越精细、更具有解释性的理论。在最宽泛的层面上，贝叶斯理论视角下的弱先验和精确似然假说关注先验和似然性建构感知的过程，但未考虑先验和似然性本身是如何发生问题的。这一层面的理论提供了一个精度较低的标尺，无法在研究中一致地衡量预测加工模式；侧重于预测编码过程的理论提供了更精确的标尺，可以更好地描述不同现象，适应了不同组成部分之间的相互作用，而不是将功能障碍定位在孤立的成分中；精确的标尺是基于精确度的理论，其强调了预测、预测误差或二者整合的不平衡的精确度权重是问题的关键所在，也具有更强的解释力。值得注意的是，在聚焦检验精确度的实证研究中，其理论解释可存在排他性，例如支持 HIPPEA 假说而同时不支持弱先验等其他假说(Sapey-Triomphe et al., 2021)。

这些理论的主要矛盾点在于预测更新损伤(Greene et al., 2019; Sapey-Triomphe et al., 2022; Treves et al., 2023)和 HIPPEA 理论。前者表明对预测误差的低敏感，而后者则提出存在过高且不灵活的预测误差精确度(Van de Cruys et al., 2014)。尽管这两种假说未能形成统一的理论观点，但鉴于 ASD 症状在个体身上的多重异质性表现，这样的多样性似乎也能够被认为是可能甚至是必要的。ASD 者的感觉体验同时出现过高或过低反应性(hyper- or hypo-responsiveness)，例如对新奇的视觉刺激视而不见和对视觉信息的轻微变化异常敏感(Baranek et al., 2006; Baranek et al., 2013; Foss-Feig et al., 2012; Robertson & Baron-Cohen, 2017)。预测更新损伤和 HIPPEA 理论是分别解释低反应性和高反应性，还是应整合到一个框架中，还需要进一步探索。值得注意的是，HIPPEA 理论中不仅指出预测误差精确度过高的精确度，也强调其不灵活性。预测更新损伤是否可整合到预测误差精确度不灵活的假设中，

是进一步完善 HIPPEA 理论的关键。

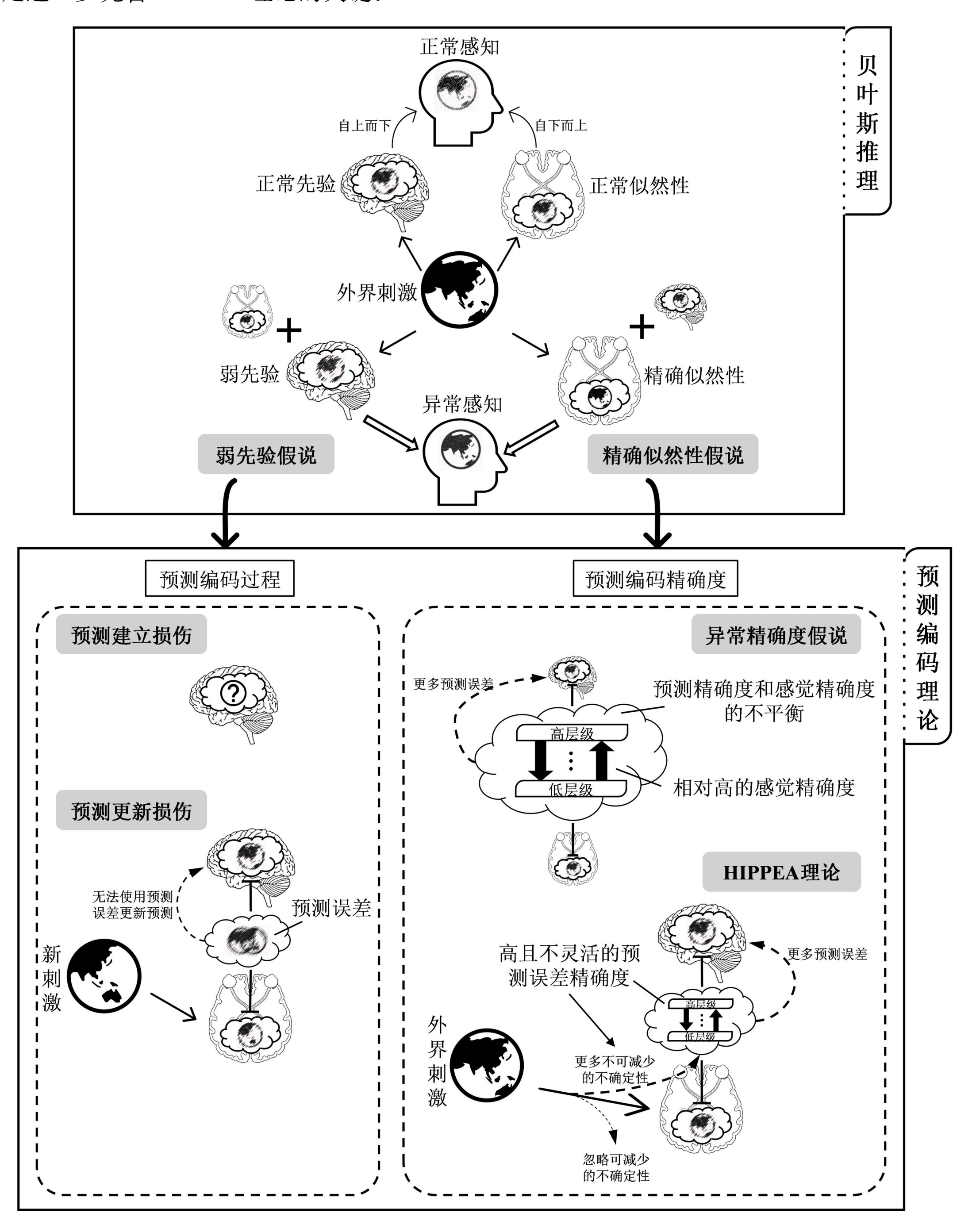


图 1 贝叶斯和预测编码理论视角下解释 ASD 感觉加工异常的理论与假说

4 展望

源于贝叶斯推理的预测编码理论被认为是认知科学中最具影响力的理论之一(Bowman et al., 2023)，其为理解 ASD 的感觉加工及其他行为异常提供了希望。但是，随着理论观点的深入和研究内容的丰富，离达成理论共识却越来越远。在这样的现状下，本文尝试从非社会视觉信息入手，并将各理论按照其所关注的内容进行分层，归纳相应的实证证据。在此基础

上，各理论和实证结果并非不可调和。鉴于从预测编码视角理解 ASD 感觉加工异常现象的复杂局面，本文提出以下三个发展方向。

4.1 发展先领域细化再整合的实践路径

与解释 ASD 的病因类似，研究者试图找到一个明确的预测编码特异性来解释 ASD 的感官加工异常现象，但更深入的研究提示寻找单一理论的尝试可能忽略了现实状况的复杂性。实际上，不应该低估大脑和 ASD 表型的复杂，特别是考虑到研究中高度受限的实验任务和模型(Noel et al., 2020)。正如经过对 ASD 病因的多年探索之后，研究者终于承认没有单一的遗传或认知上的原因导致 ASD 的不同症状(Happé et al., 2006)。因此，对于 ASD 感觉加工异常问题，也应该摆脱寻找简洁明确的单一理论的思路禁锢。在这一思路的指导下，可从以下两个方面开展工作：

一方面，与本文一致，对研究领域进行细分进而考察领域内的分歧与可整合性。例如聚焦听觉、触觉或社会性视觉信息的预测加工等。有研究发现，当光栅在空间频率上发生变化时, ASD 者的检测阈值和反应阈值更高；但当光栅在对比度上发生变化时, ASD 者的阈值则与 TD 者没有差异(Sapey-Triomphe, Dierckx, et al., 2023)。这类研究将非社会视觉信息进一步区分到空间频率与对比度的精细程度，并发现 ASD 者对两类视觉属性的加工存在差异。从更具体的领域入手来检验理论争议，则更可能在小范围内达成某种程度的一致性。另外，从实证研究中可以发现，研究设计取决于想要检验的问题，这也直接导致了检验不同理论的实验范式存在较大差异，很少有研究能直接区分不同理论。因此，在关注领域特异性的同时还需要注重实验范式的应用与创新。

另一方面则为在领域细分的基础上展开进一步对比与整合，明确各个领域间预测编码机制的共性与个性。例如针对 ASD 者的非典型感觉加工和社会性信息加工之间的关系，存在以下三种观点：第一，实证研究可能直接将非社会视觉层面的结果推广到社会性认知层面，认为两者互相关联，且源于共同的预测受损机制(Ganglmayer et al., 2020)；第二种观点则更进一步地指出, ASD 者感觉加工的预测障碍是导致社会性信息预测障碍的前因(Falck-Ytter & Bussu, 2023)；但也有研究者提出两者之间可能彼此分离，例如非社会性信息预测编码正常，而社会性信息的预测编码受损(Bosch et al., 2022)。因此, ASD 者的非典型感觉加工和社会性信息加工之间的关系，究竟是相关、因果还是分离，仍然需要更多的实证研究和理论整合加以验证和深化。

总体而言，这一"先细化再整合"的研究策略不仅有助于处理当前理论视角的分歧，也将

大幅推进我们对 ASD 的预测编码机制异常以及其发展路径的理解，逐渐完善用预测编码解释 ASD 感觉加工异常的理论框架，为 ASD 群体的诊断和干预提供更加精准的科学依据。

4.2 关注 ASD 者主观层面的视觉体验

现有研究主要从两个方面关注 ASD 者的非典型性视觉感知，一是行为层面，例如视觉检测或辨别，主要体现在任务表现上；二是神经活动层面，即感知过程中神经活动的变化。而对于主观层面的视觉体验则处于忽视状态。有研究发现，在使用计算模型对 ASD 的视觉预测编码进行拟合时，对客观行为层面的数据结果拟合良好，而对主观报告层面则较差(Karvelis et al., 2018)。这也体现出意识领域一直以来的研究难题，即主观报告的结果难以量化。

从贝叶斯或预测编码视角来理解 ASD 最核心的观点在于，人类的大脑主动地去解释视觉信息，而不是被动的感知它(Intaitė et al., 2019)，仅关注对 ASD 的理论解释可能存在本末倒置的风险。研究者试图建立理解 ASD 者感觉加工异常的理论，但该理论却较少从 ASD 者自身的体验中得到验证。正如 Todorova 等(2024)所言，这通常会让个人觉得他们必须符合理论的定义，而不是理论是否符合他们的经验。Todorova 等(2024)认为，在试图用理论解释 ASD 者感觉信息加工异常的努力中，忽视了 ASD 者自身的声音。通过问卷调查和访谈 ASD 成人对 HIPPEA 的看法，结果发现, ASD 者认为 HIPPEA 理论能够为他们的很多生活经验提供解释。他们体验到的世界真的很微妙，它看起来像是被像素化了。但是, HIPPEA 理论关于人际互动、情感加工和动机等高层级认知加工的解释则存在质疑。

这一研究在大量探究 ASD 预测编码异常的实证研究中显得独树一帜，其结合现象学证据有助于确定所提出的理论机制转化为日常的感知经验和决策。因此，找到合适的可测量 ASD 不同发展阶段的主观体验的方式尤其重要。创造性的方法可能实现主观现象的捕捉，例如 ASD 儿童的绘画内容等。将主观现象转化为具体指标仍然是一个艰难的挑战。尽管如此，从 ASD 者第一人称视角来检验理论仍是不可或缺的关键环节。事实上，即使是神经正常的个体，面对相同的感官世界，也会构建不同的感知表征(Tarasi et al., 2023)。预测编码强调感知的主观性和多样性。对于 ASD 者来说，他们可能体验到一个混乱和不稳定的视觉世界，而这种体验需要他们自己的表达。

4.3 从发展性视角考察 ASD 者的预测编码异常

多数实证研究均基于特定年龄阶段的 ASD 者开展，例如幼儿、儿童、青少年或成人等，

较少有研究同时考虑不同年龄阶段 ASD 者的预测编码差异。这可能是因为面临研究对象获取困难和研究范式需兼顾不同年龄阶段 ASD 者能力差异的双重挑战，但从发展性视角考察 ASD 者的预测编码机制也非常重要。

一种可能性，ASD 者的预测编码异常会随着心理年龄的增长而逐渐缓解。这一假设来自于关于对 ASD 者感觉症状的观察，例如有研究发现 ASD 者感觉症状与心理年龄呈负相关 (Baranek et al., 2006)。如果预测编码机制的异常确实是导致这些感觉症状的主因，那么随着大脑发育的进一步成熟，这种异常可能也会逐步减弱。研究发现，高功能 ASD 者在不断用自己的方式适应外界环境(Ai et al., 2022)。因此，年龄的增长可能使 ASD 者逐步建立起更有效的内部模型，从而提高对预测误差的容忍度，降低对细微变化的过度敏感性。那么，预测编码异常症状的关键缓解时间点可能就需要进一步的纵向追踪研究来验证。另外，不同的研究结果差异也可能因不同年龄的被试群体所致。

第二种可能性则相反，即预测编码机制在早期均不完善，但随着年龄增长，ASD 者无法像 TD 者那样有效地建立和优化预测编码。这一假设来自于部分研究结果。有研究发现，相比于 TD 成人，ASD 和 TD 儿童的利用先验信息的编码均不精确(Van de Cruys et al., 2021)；而 Lawson 等(2017)发现成年 ASD 者表现出高估感官环境波动性的倾向，且这种倾向并不存在于 ASD 儿童中。那么，是否存在这样一种可能性，即 ASD 和 TD 儿童对语境性先验的建立都比较弱，而 TD 儿童随着时间发展，预测编码能力的发育逐渐完善。相比之下，ASD 儿童的统计学习发展则受到了阻碍，进而导致在成年后出现预测编码障碍。也就是说，预测编码障碍是随着时间逐渐发展的，而非从一开始即与 TD 儿童存在巨大差异。

无论哪一种发展轨迹更接近事实，都需要纵向追踪和多模态的实证研究来加以验证。从发展性视角对于理解 ASD 的预测编码机制至关重要，这种视角不仅有助于厘清症状变化的时间进程，更能够揭示症状的发生根源是机制本身存在先天缺陷还是发育过程中出现了障碍，亦或是二者的共同作用。未来的工作应设置前瞻性的纵向追踪研究，以找出预测编码随着时间推移在 ASD 中的发展变化。

参考文献

柴浩，王淇，曹秀爱，徐云. (2022). 自闭症预测编码理论的研究进展. *中国临床心理学杂志, 30*(5), 1047–1051.

陈晓雯，蔡文淑，谢桐，傅世敏. (2020). 孤独症谱系障碍者视觉定向与视觉搜索的特点及神经机制. *心理科学进展, 28*(1), 98–110.

黄钰杰，赵荣，克丽比努尔·艾尔肯，李晶晶，王俊琪，潘海萍，高军. (2023). 自闭症谱系障碍的社会功能障

碍: 触觉与催产素. *心理科学进展, 31*(5), 800–814.

Ai, W., Cunningham, W. A., & Lai, M.-C. (2022). Reconsidering autistic “camouflaging” as transactional impression management. *Trends in Cognitive Sciences, 26*(8), 631–645.

Arthur, T., Brosnan, M., Harris, D., Buckingham, G., Wilson, M., Williams, G., & Vine, S. (2023). Investigating how explicit contextual cues affect predictive sensorimotor control in autistic adults. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 53*(11), 4368–4381.

Baranek, G. T., David, F. J., Poe, M. D., Stone, W. L., & Watson, L. R. (2006). Sensory Experiences Questionnaire: Discriminating sensory features in young children with autism, developmental delays, and typical development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 47*(6), 591–601.

Baranek, G. T., Watson, L. R., Boyd, B. A., Poe, M. D., David, F. J., & McGuire, L. (2013). Hyporesponsiveness to social and nonsocial sensory stimuli in children with autism, children with developmental delays, and typically developing children. *Development and Psychopathology, 25*(2), 307–320.

Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ): Evidence from asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 31*(1), 5–17.

Binur, N., Hel-Or, H., & Hadad, B.-S. (2022). Individuals with autism show non-adaptive relative weighting of perceptual prior and sensory reliability. *Autism, 26*(8), 2052–2065.

Bosch, E., Fritsche, M., Utzerath, C., Buitelaar, J. K., & de Lange, F. P. (2022). Adaptation and serial choice bias for low-level visual features are unaltered in autistic adolescents. *Journal of Vision, 22*(6), 1–20.

Bowman, H., Collins, D. J., Nayak, A. K., & Cruse, D. (2023). Is predictive coding falsifiable? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 154*, Article 105404.

Brisson, J., Warreyn, P., Serres, J., Foussier, S., & Adrien-Louis, J. (2012). Motor anticipation failure in infants with autism: A retrospective analysis of feeding situations. *Autism, 16*(4), 420–429.

Brock, J. (2012). Alternative Bayesian accounts of autistic perception: Comment on Pellicano and Burr. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(12), 573–574.

Carther-Krone, T. A., Shomstein, S., & Marotta, J. J. (2016). Looking without perceiving: Impaired preattentive perceptual grouping in autism spectrum disorder. *PLOS ONE, 11*(6), e0158566.

Chalk, M., Seitz, A., & Series, P. (2010). Rapidly learned expectations alter perception of motion. *Journal of Vision, 10*(7), 237–237.

Chen, Y.-J., Sideris, J., Watson, L. R., Crais, E. R., & Baranek, G. T. (2022). Developmental trajectories of sensory patterns from infancy to school age in a community sample and associations with autistic traits. *Child Development, 93*(4), e446–e459.

Chrysaitis, N. A, & Seriès, P. (2023). 10 years of Bayesian theories of autism: A comprehensive review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 145*, 105022.

Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences, 3*(3), 181–204.

D’Mello, A. M., Frosch, I. R., Meisler, S. L., Grotzinger, H., Perrachione, T. K., & Gabrieli, J. D. E. (2023). Diminished repetition suppression reveals selective and systems-level face processing differences in ASD. *The Journal of Neuroscience, 43*(11), 1952–1962.

Falck-Ytter, T., & Bussu, G. (2023). The sensory-first account of autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 153*, 105405.

Falck-Ytter, T., Nyström, P., Gredebäck, G., Gliga, T., & Bölte, S. (2018). Reduced orienting to audiovisual synchrony in infancy predicts autism diagnosis at 3 years of age. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 59*(8), 872–880.

Feldman, H., & Friston, K. (2010). Attention, Uncertainty, and Free-Energy. *Frontiers in Human Neuroscience, 4*, 7028.

Feuerriegel, D., Vogels, R., & Kovács, G. (2021). Evaluating the evidence for expectation suppression in the visual system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 126*, 368–381.

Foss-Feig, J. H., Heacock, J. L., & Cascio, C. J. (2012). Tactile responsiveness patterns and their association with core features in autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders, 6*(1), 337–344.

Fredrik, A., Zhuanghua, S., Pistorius, R. L., Theisinger, L. A., Nikolaos, K., Falkai, P., ... Falter-Wagner, C. (2021). Acquisition and use of 'Priors' in autism: Typical in deciding where to look, atypical in deciding what is there. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 51*(10), 3744–3758.

Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360*(1456), 815–836.

Friston, K. J., Lawson, R., & Frith, C. D. (2013). On hyperpriors and hypopriors: Comment on Pellicano and Burr. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(1), 1.

Gandal, M. J., Haney, J. R., Wamsley, B., Yap, C. X., Parhami, S., Emani, P. S., … Geschwind, D. H. (2022). Broad transcriptomic dysregulation occurs across the cerebral cortex in ASD. *Nature, 611*(7936), 532–539.

Ganglmayer, K., Schuwerk, T., Sodian, B., & Paulus, M. (2020). Do children and adults with autism spectrum condition anticipate others' actions as goal-directed? A predictive coding perspective. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 50*(6), 2077–2089.

Girault, J. B., Donovan, K., Hawks, Z., Talovic, M., Forsen, E., Elison, J. T., … Piven, J. (2022). Infant visual brain development and inherited genetic liability in autism. *The American Journal of Psychiatry, 179*(8), 573–585.

Girshick, A. R., Landy, M. S., & Simoncelli, E. P. (2011). Cardinal rules: Visual orientation perception reflects knowledge of environ mental statistics. *Nature Neuroscience, 14*(7), 926–932.

Greene, R. K., Zheng, S., Kinard, J. L., Mosner, M. G., Wiesen, C. A., Kennedy, D. P., & Dichter, G. S. (2019). Social and nonsocial visual prediction errors in autism spectrum disorder. *Autism Research, 12*(6), 878–883.

Happé, F., Ronald, A., & Plomin, R. (2006). Time to give up on a single explanation for autism. *Nature Neuroscience, 9*(10), 1218–1220.

Intaitė, M., Georgescu, A. L., Noreika, V., von Saldern, M. A., Vogeley, K., & Falter-Wagner, C. M. (2019). Adults with autism spectrum condition have atypical perception of ambiguous figures when bottom-up and top-down interactions are incongruous. *Autism, 23*(5), 1133–1142.

Jassim, N., Baron-Cohen, S., & Suckling, J. (2021). Meta-analytic evidence of differential prefrontal and early sensory cortex activity during non-social sensory perception in autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 127*, 146–157.

Karvelis, P., Seitz, A. R., Lawrie, S. M., & Seriès, P. (2018). Autistic traits, but not schizotypy, predict increased weighting of sensory information in Bayesian visual integration. *eLife, 7*, e34115.

Knight, E. J., Freedman, E. G., Myers, E. J., Berruti, A. S., Oakes, L. A., Cao, C. Z., ... Foxe, J. J. (2023). Severely attenuated visual feedback processing in children on the autism spectrum. *Journal of Neuroscience, 43*(13), 2424–2438.

Król, M., & Król, M. (2019). The world as we know it and the world as it is: Eye-movement patterns reveal decreased use of prior knowledge in individuals with autism. *Autism Research, 12*(9), 1386–1398.

Lawson, R. P., Mathys, C., & Rees, G. (2017). Adults with autism overestimate the volatility of the sensory environment. *Nature Neuroscience, 20*(9), 1293–1299.

Lawson, R. P., Aylward, J., Roiser, J. P., & Rees, G. (2018). Adaptation of social and non-social cues to direction in adults with autism spectrum disorder and neurotypical adults with autistic traits. *Developmental Cognitive*

Neuroscience, 29, 108–116.

Lawson, R. P., Rees, G., & Friston, K. J. (2014). An aberrant precision account of autism. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 302.

Martínez, K., Martínez-García, M., Marcos-Vidal, L., Janssen, J., Castellanos, F. X., Pretus, C., ... Carmona, S. (2020). Sensory-to-cognitive systems integration is associated with clinical severity in autism spectrum disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 59*(3), 422–433.

Maule, J., Stanworth, K., Pellicano, E., & Franklin, A. (2017). Ensemble perception of color in autistic adults. *Autism Research, 10*(5), 839–851.

Nayar, K., Voyles, A. C., Kiorpes, L., & Di Martino, A. (2017). Global and local visual processing in autism: An objective assessment approach. *Autism Research, 10*(8), 1392–1404.

Noel, J.-P., Failla, M. D., Quinde-Zlibut, J. M., Williams, Z. J., Gerdes, M., Tracy, J. M., ... Cascio, C. J. (2020). Visual-tactile spatial multisensory interaction in adults with autism and schizophrenia. *Frontiers in Psychiatry, 11*, Article 578401.

Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychological Bulletin, 143*(5), 521–542.

Paton, B., Hohwy, J., & Enticott, P. G. (2012). The rubber hand illusion reveals proprioceptive and sensorimotor differences in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 42*(9), 1870–1883.

Pellicano, E. (2013). Sensory symptoms in autism: A blooming, buzzing confusion? *Child Development Perspectives, 7*(3), 143–148.

Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes "too real": A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(10), 504–510.

Pesthy, O., Farkas, K., Sapey-Triomphe, L. A., Guttengéber, A., Komoróczy, E., Janacsek, K., ... Németh, D. (2023). Intact predictive processing in autistic adults: evidence from statistical learning. *Scientific Reports, 13*(1), Article 11873.

Piccardi, E. S., Begum Ali, J., Jones, E. J. H., Mason, L., Charman, T., Johnson, M. H., & Gliga, T. (2021). Behavioural and neural markers of tactile sensory processing in infants at elevated likelihood of autism spectrum disorder and/or attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurodevelopmental Disorders, 13*(1), 1–18.

Robertson, C. E., & Baron-Cohen, S. (2017). Sensory perception in autism. *Nature Reviews Neuroscience, 18*(11), 671–684.

Rozenkrantz, L., D'Mello, A. M., & Gabrieli, J. D. (2021). Enhanced rationality in autism spectrum disorder. *Trends in Cognitive Sciences, 25*(8), 685–696.

Sapey-Triomphe, L.-A., Timmermans, L., & Wagemans, J. (2021). Priors bias perceptual decisions in autism, but are less flexibly adjusted to the context. *Autism Research, 14*(6), 1134–1146.

Sapey-Triomphe, L.-A., Dierckx, J., Vettori, S., van Overwalle, J., & Wagemans, J. (2023). A multilevel investigation of sensory sensitivity and responsivity in autistic adults. *Autism Research, 16*(7), 1299–1320.

Sapey-Triomphe, L.-A., Pattyn, L., Weilnhammer, V., Sterzer, P., & Wagemans, J. (2023). Neural correlates of hierarchical predictive processes in autistic adults. *Nature Communications, 14*(1), 3640.

Sapey-Triomphe, L.-A., Weilnhammer, V. A., & Wagemans, J. (2022). Associative learning under uncertainty in adults with autism: Intact learning of the cue-outcome contingency, but slower updating of priors. *Autism, 26*(5), 1216–1228.

Schubert, J., Suess, N., & Weisz, N. (2023). Individual prediction tendencies do not generalize across modalities. *Psychophysiology, 61*(1), e14435.

Schuwerk, T., Sodian, B., & Paulus, M. (2016). Cognitive mechanisms underlying action prediction in children

and adults with autism spectrum condition. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 46*(12), 3623–3639.

Seriès, P., & Seitz, A. R. (2013). Learning what to expect (in visual perception). *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 668.

Seymour, R. A., Rippon, G., Gooding-Williams, G., Schoffelen, J. M., & Kessler, K. (2019). Dysregulated oscillatory connectivity in the visual system in autism spectrum disorder. *Brain, 142*(10), 3294–3305.

Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., … Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 111*(42), 15220–15225.

Stevenson, R. A., Siemann, J. K., Woynaroski, T. G., Schneider, B. C., Eberly, H. E., Camarata, S. M., & Wallace, M. T. (2014). Evidence for diminished multisensory integration in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 44*(12), 3161–3167.

Summerfield, C., & Egner, T. (2009). Expectation (and attention) in visual cognition. *Trends in Cognitive Sciences, 13*(9), 403–409.

Summerfield, C., & Egner, T. (2016). Feature-based attention and feature-based expectation. *Trends in Cognitive Sciences, 20*(6), 401–404.

Tan, C., Xing, Q.-Q., Yuan, Z., Hai, S., Zhu, C., Qiu, J.-J., … Liu, D.-Z. (2023). Goal-directed action anticipation and prediction error processing in children with autism spectrum disorders: An eye-movement study. *Research in Autism Spectrum Disorders, 106*, 102199.

Tarasi, L., Martelli, M. E., Bortoletto, M., di Pellegrino, G., & Romei, V. (2023). Neural signatures of predictive strategies track individuals along the autism-schizophrenia continuum. *Schizophrenia Bulletin, 49*(5), 1294–1304.

Teufel, C., & Fletcher, P. C. (2020). Forms of prediction in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience, 21*(4), 231–242.

Tewolde, F. G., Bishop, D. V., & Manning, C. (2018). Visual motion prediction and verbal false memory performance in autistic children. *Autism Research, 11*(3), 509–518.

Todorova, G. K., Hatton, R. E. M., Sadique, S., & Pollick, F. E. (2024). The world is nuanced but pixelated: Autistic individuals' perspective on HIPPEA. *Autism, 28*(2), 498–509.

Treves, I. N., Cannon, J., Shin, E., Li, C. E., Bungert, L., O'Brien, A., ... Gabrieli, J. D. (2024). Autistic adults show intact learning on a visuospatial serial reaction time task. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 54*(4), 1549–1557.

Utzerath, C., Schmits, I. C., Buitelaar, J., & de Lange, F. P. (2018). Adolescents with autism show typical fMRI repetition suppression, but atypical surprise response. *Cortex, 109*, 25–34.

Utzerath, C., Schmits, I. C., Kok, P., Buitelaar, J., & de Lange, F. P. (2019). No evidence for altered up-and downregulation of brain activity in visual cortex during illusory shape perception in autism. *Cortex, 117*, 247–256.

van Boxtel, J. J. A., & Lu, H. (2013). A predictive coding perspective on autism spectrum disorders. *Frontiers in Psychology, 4*, 40641.

Van de Cruys, S., Lemmens, L., Sapey-Triomphe, L. A., Chetverikov, A., Noens, I., & Wagemans, J. (2021). Structural and contextual priors affect visual search in children with and without autism. *Autism Research, 14*(7), 1484–1495.

Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., de BoetsWit, B. L. J., & Wagemans. J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: Predictive coding in autism. *Psychological Review, 121*(4), 649–675.

Van de Cruys, S., Vanmarcke, S., Van de Put, I., & Wagemans, J. (2018). The use of prior knowledge for perceptual inference is preserved in ASD. *Clinical Psychological Science, 6*(3), 382–393.

Ward, E. K., Buitelaar, J. K., & Hunnius, S. (2022). Implicit learning in 3-year-olds with high and low likelihood of autism shows no evidence of precision weighting differences. *Developmental Science, 25*(2), e13158.

Wasifa, J., Annie, C., Haskins, A. J., Kjelgaard, M., & Pawan, S. (2021). Reduced sensory habituation in autism and its correlation with behavioral measures. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 51*(9), 3153–3164.

Weiss, Y., Simoncelli, E. P., & Adelson, E. H. (2002). Motion illusions as optimal percepts. *Nature Neuroscience, 5*(6), 598–604.

Whitney, D., & Yamanashi, L. A. (2017). Ensemble perception. *Annual Review of Psychology, 69*, 105–129.

Zampella, C. J., Wang, L. A., Haley, M., Hutchinson, A. G., & de Marchena, A. (2021). Motor skill differences in autism spectrum disorder: A clinically focused review. *Current Psychiatry Reports, 23*(10), Article 64.

Visual perception in individuals with autism spectrum disorder: Bayesian and predictive coding-based perspective

FU Chunye, LI Aixin, LYU Xiaokang, WANG Chongying

(Department of Social Psychology, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Bayesian and predictive coding theories have been instrumental in elucidating sensory processing aberrations observed in individuals with Autism Spectrum Disorder (ASD). However, these theories have sparked considerable debate within the scientific community. In this paper, we focus on non-social visual information, presenting a comprehensive examination of theoretical nuances and consolidating empirical evidence across three key dimensions: Bayesian inference, predictive coding processes, and predictive coding precision. Generally, hypo-priors and sharper likelihood hypothesis based on Bayesian inference merely provide descriptive insights into visual processing abnormalities associated with ASD. While perspectives emphasizing the predictive coding process enhance the specificity of visual processing aberrations, they fall short of offering a fully explanatory framework. On the other hand, hypotheses centered on predictive coding precision provide theoretical foundations, yet require further refinement of the theoretical details and their validity necessitates testing through refined empirical studies. Future research should generalize the specificity of predictive processing in ASD, test the theoretical content from the perspective of subjective experience of ASD, and examine the changes of predictive functioning in the growth of ASD through a developmental perspective.

Keywords: Autism spectrum disorder, visual perception, non-social information, Bayesian, predictive coding